第39卷 第2期
2022年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

吐鲁番盆地平原区地下水水化学特征及水质评价

白 凡[1,2,3]， 周金龙[1,2,3]， 曾妍妍[1,2,3]

（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆水文水资源工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要： 为研究吐鲁番盆地平原区地下水水化学特征及水质状况，根据吐鲁番地区2015年（最近1次）全面的地下水污染调查数据，选取44组地下水水质检测数据（潜水33组，承压水11组），运用数理统计、Piper三线图、Gibbs图、离子比值法对研究区地下水水化学特征及成因进行分析，运用内梅罗指数法、改进内梅罗指数法和模糊综合评价法对研究区地下水质量进行评价。结果表明：（1）吐鲁番盆地平原区地下水主要为低矿化度的弱碱性水，水化学类型以SO_4·Cl-Na·Ca型和HCO_3·SO_4-Na·Ca型为主，其次为HCO_3·SO_4·Cl-Na·Ca型；研究区水化学成分主要受蒸发浓缩和岩石风化共同作用的影响。（2）地下水中的Ca^{2+}、Mg^{2+}主要来自蒸发岩的溶解，Na^+、K^+、Cl^-主要来自岩盐的溶解，少量潜水中的Na^+和K^+来自硅酸盐的溶解。（3）$\gamma(Na^+-Cl^-)/\gamma[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]=-1$，呈显著负相关，说明地下水化学组分的形成受到了阳离子交换作用的影响。（4）水质评价结果显示：3种评价方法中的Ⅲ类及以上水质占比均高于55%，地下水质量整体较好；模糊综合评价法的Ⅳ、Ⅴ类水占比最低为27.3%，Ⅳ、Ⅴ类水主要分布在托克逊县的博斯坦乡和鄯善县以东的火车站镇和七克台镇。

关键词： 吐鲁番盆地；地下水；水化学特征；水质评价

水资源是制约我国西北干旱地区社会经济可持续发展与生态环境建设最重要的因素之一[1]。新疆吐鲁番盆地属于典型的大陆性暖温带荒漠气候，降水稀少且大风频繁，故有“火洲”“风库”之称[2]。根据《2015年新疆水资源公报》显示，吐鲁番地区地下水供水量为7.87×10^8 m^3，占总供水量的58.4%，地下水是其主要的供水水源[3]。由于地下水过量开采，导致地下水位下降、坎儿井枯竭、地质环境变化等问题，水环境破坏现象突出[4]。开展区域地下水水化学特征及水质评价研究，是了解地下水系统循环更新路径的重要方法，是对当地居民用水安全的重要保障[5-6]。

竹娜等[7]运用统计分析、相关分析和Piper三线图阐述了吐鲁番盆地地下水水化学特征的变化。蒋万军等[8]运用Piper三线图、氢氧稳定同位素、Gibbs图及离子相关性分析等方法说明新疆吐哈盆地地下水的补给来源主要以大气降水为主，排泄以蒸发为主；溶滤作用、蒸发浓缩作用是地下水化学组分形成的主要影响因素。杨广焱等[9]采用单因子评价法和浓度对比法对新疆吐鲁番地区地下水质量及污染状况进行了评价，并从原生环境和人为因素两个方面分析了吐鲁番盆地地下水质量总体较差和水质污染的原因。袁月等[10]选取地下水开采潜力、生态敏感性、土壤盐渍化程度作为评价因子，运用层次分析法对吐鲁番地区地下水资源、生态和地质环境功能进行综合评价。目前有关吐鲁番盆地平原区的地下水水化学特征及水质评价的相关研究还十分有限。

本文依据吐鲁番地区2015年（最近一次）全面的地下水污染调查数据，选取44组地下水检测数据（潜水33组、承压水11组），运用经典统计学、Piper三线图解法、Gibbs图解法和离子比值法对研究区地下水水化学特征及成因进行分析，并利用内梅罗指数法、改进内梅罗指数法和模糊综合评价法对研究区地下水质量进行评价，以期为当地地下水资源保护和可持续开发利用提供一定的科学依据和参考。

收稿日期： 2021-09-10； **修订日期：** 2021-11-20
基金项目： 中国地质调查局项目（1212011220982）
作者简介： 白凡（1994-），男，硕士研究生，主要从事干旱区地下水资源评价与保护方面的研究. E-mail: 89304394@qq.com
通讯作者： 周金龙. E-mail: zjzhoujl@163.com

1 研究区概况

吐鲁番盆地地处新疆东部，包括高昌区、鄯善县和托克逊县。盆地南北宽约240 km，东西长约300 km，东部为库木塔格沙漠，南部为觉罗塔格山，北部为天山山脉，乌鲁木齐市位于盆地的西北方向，位于盆地中部的艾丁湖是吐鲁番盆地的最低点，海拔为-154 m[9]。吐鲁番盆地地处中纬度亚欧大陆腹地，属大陆性暖温带荒漠性气候，降水稀少，年降水量约16 mm，蒸发强烈，蒸发量高达3000 mm；夏季炎热，最高气温超过49.6 ℃，6—8月平均最高气温均在38 ℃以上，因此，吐鲁番盆地自古有"火洲"之称；盆地光照充足，全年日照达3000 h以上，由于盆地气压低，这里也是全国有名的"风库"[2]。吐鲁番盆地属于天山山间拗陷盆地，火焰山呈东西向分布于盆地间，将盆地分为南、北两个盆地。北盆地埋藏分布有潜水和承压水，潜水主要埋藏分布在山前冲—洪积扇群的松散岩类孔隙水之中；承压水主要埋藏分布在北盆地东部的鄯善县七克台一带，主要为粗细颗粒沉积物相间的多层结构含水层。南盆地潜水基本上呈环带状沿盆地边缘分布，含水层岩性以松散砂、卵砾石为主；承压水主要埋藏分布在南盆地冲积—洪积—湖积平原之内，多为中粗砂、粉细砂及黏性土相间的多层结构含水层[11]，研究区水文地质及地下水取样点分布见图1。研究区地下水补给主要有平原区的降水、渠系

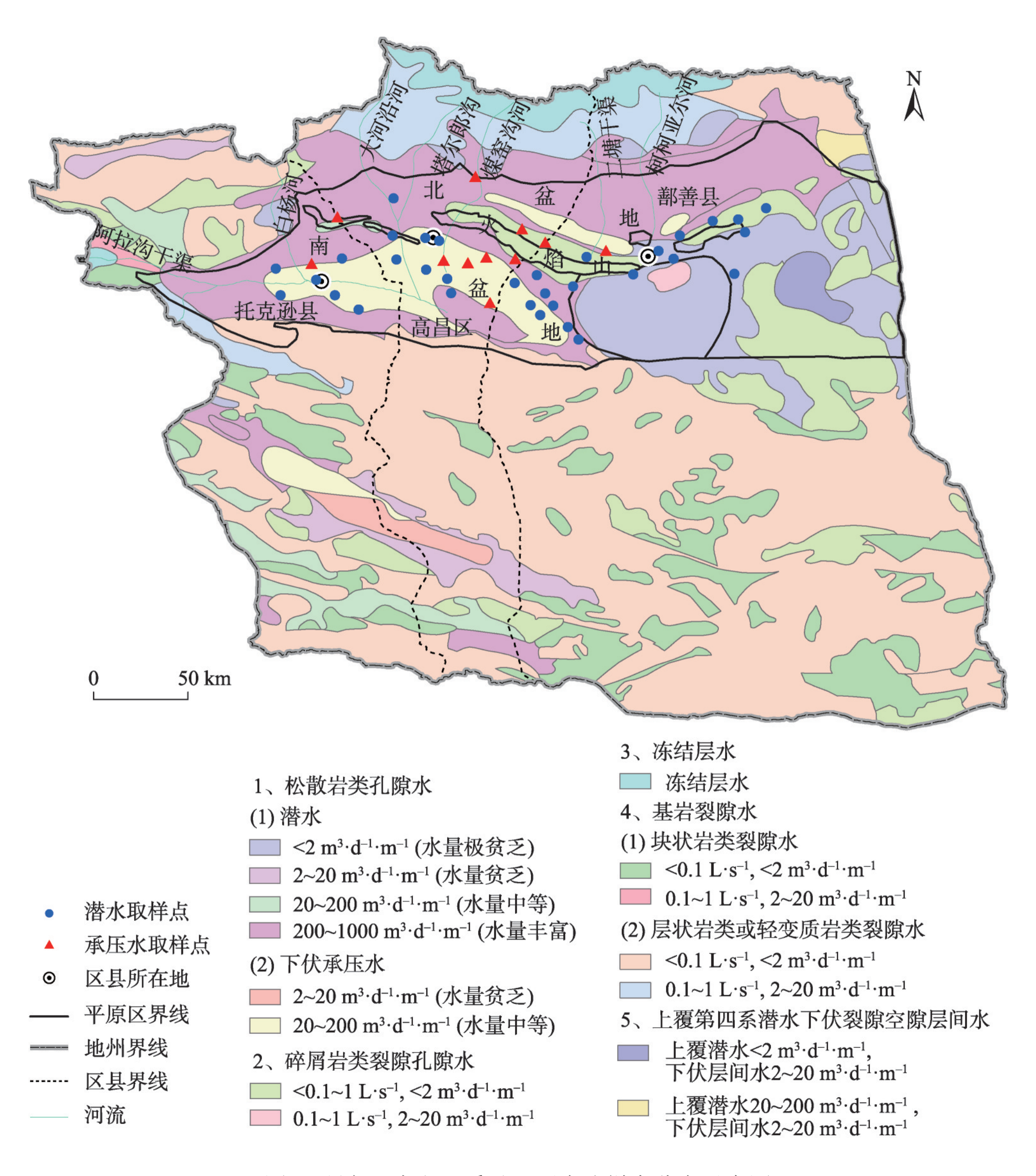
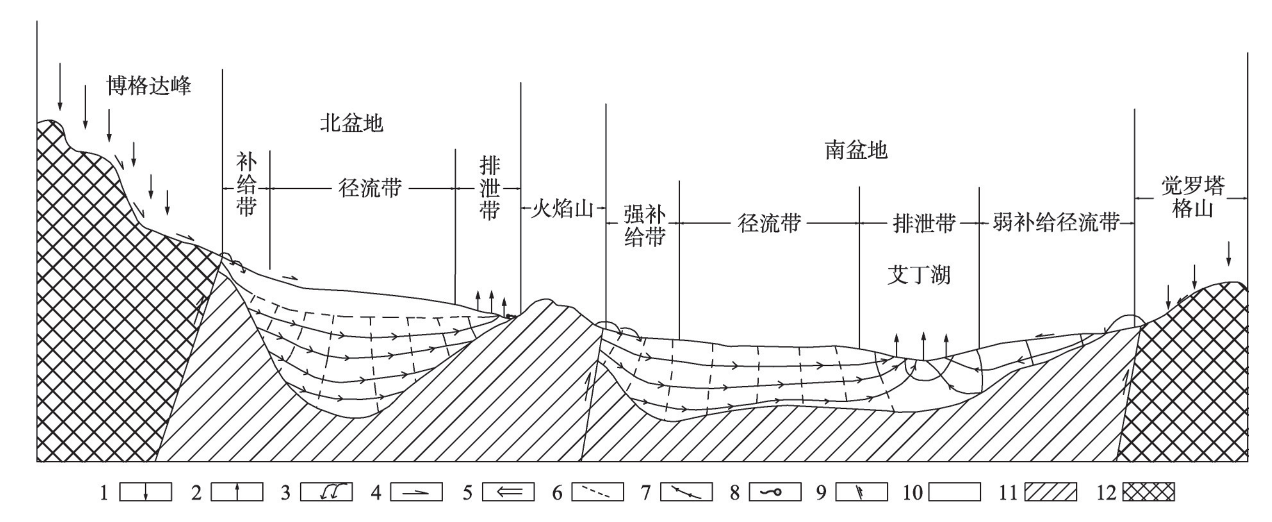


图1 研究区水文地质及地下水取样点分布示意图

Fig. 1 Hydrogeologic and distribution of groundwater sampling points in the study area



注：1. 大气降水，2. 地下水蒸发，3. 地表水入渗，4. 地表水径流，5. 地下水潜流，6. 等水位线，7. 流向，8. 泉，9. 断层，10. Q3–4含水系统，11. N+J相对隔水层，12. 基岩。

图2　吐鲁番盆地地下水补径排关系示意图

Fig. 2　Schematic diagram of groundwater recharge and drainage relationship in Turpan Basin

水及田间灌溉水入渗补给和山间基岩裂隙水侧向径流补给。地下水的排泄方式以蒸发蒸腾、机井与坎儿井开采为主[12]。吐鲁番盆地地下水补径排关系如图2所示[13]。

2　材料与方法

2.1　样品采集

地下水取样点分布于吐鲁番盆地平原区，取样时间为2015年7月，取样点控制面积为18092.3 km^2，地下水取样点个数严格遵循《区域地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288—2015)[14]进行布设，共采集地下水水样44组(潜水33组，承压水11组)(图1)，取样点密度为2.43组·$(10km^2)^{-1}$，符合1:250000区域地下水污染调查评价的精度要求。

2.2　样品测试

地下水水样严格按照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 146—2020)[15]进行采集、保存和运输。pH、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)、电导率(EC)由现场测定，其他指标测试由新疆地矿局第二水文地质大队化验室完成，检测项目包括：K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)等无机指标。

2.3　研究方法

44组水样阴阳离子平衡误差绝对值均小于5%，数据均可用于分析[16]。本文运用经典统计学、Piper三线图解法、Gibbs图解法和离子比值法对研究区地下水水化学特征及成因进行分析，并利用内梅罗指数法、改进内梅罗指数法和模糊综合评价法对研究区地下水质量进行评价。

3　地下水水化学特征及成因分析

3.1　地下水水化学特征

3.1.1　水化学成分含量　由表1可知，承压水水化学指标含量的变异系数明显小于潜水水化学指标含量的变异系数，说明潜水水化学指标含量的空间差异性较大。

潜水水样的pH介于7.51~8.22，呈弱碱性。TDS变化范围为248.4~6616.6 mg·L^{-1}，均值为1226.4 mg·L^{-1}，按TDS可将地下水类型划分为：淡水(TDS<1 g·L^{-1})、微咸水(1 g·L^{-1}<TDS<3 g·L^{-1})、咸水(3 g·L^{-1}<TDS<10 g·L^{-1})、盐水(10 g·L^{-1}<TDS<50 g·L^{-1})；其中淡水、微咸水、盐水分别占潜水水样的57.6%、36.4%、6.0%。水样中TH的变化范围为60.0~2482.0 mg·L^{-1}，均值为519.59 mg·L^{-1}，其中极软水(TH≤75 mg·L^{-1})、软水(75 mg·L^{-1}<TH≤150 mg·L^{-1})、微硬水(150 mg·L^{-1}<TH≤300 mg·L^{-1})、硬水(300 mg·L^{-1}<TH≤450 mg·L^{-1})、极硬水(>450 mg·L^{-1})分别占潜水水样的3.0%、12.1%、33.3%、15.2%、36.4%。

承压水样的pH介于7.87~8.38，呈弱碱性。TDS变化范围为209.8~1067.2 mg·L^{-1}，均值为509.44

表1 地下水水化学成分特征值

Tab. 1 Characteristic values of groundwater hydrochemical indexes

类型	统计值	pH	TH	TDS	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
潜水（n=33）	最小值/(mg·L^{-1})	7.51	60.00	248.80	0.60	20.30	1.90	20.80	21.30	48.00	76.30
	最大值/(mg·L^{-1})	8.22	2482.00	6616.60	17.80	1440.00	212.60	713.40	2446.00	2526.40	384.40
	平均值/(mg·L^{-1})	7.93	519.59	1226.40	3.87	213.32	39.25	143.35	311.22	398.88	147.20
	标准差/(mg·L^{-1})	0.17	532.60	1457.46	3.43	312.08	43.94	145.46	481.10	503.29	75.92
	变异系数/%	0.02	1.02	1.19	0.89	1.46	1.12	1.01	1.55	1.26	0.52
承压水（n=11）	最小值/(mg·L^{-1})	7.87	80.10	209.80	0.60	11.40	2.40	22.00	11.30	40.30	54.90
	最大值/(mg·L^{-1})	8.38	680.50	1067.20	2.60	130.60	48.60	192.40	322.60	440.00	180.00
	平均值/(mg·L^{-1})	8.09	250.56	509.44	1.65	68.13	19.65	67.95	85.78	170.45	120.76
	标准差/(mg·L^{-1})	0.16	168.21	264.40	0.58	38.04	14.28	49.79	80.72	120.91	40.18
	变异系数/%	0.02	0.67	0.52	0.35	0.56	0.73	0.73	0.94	0.71	0.33

注：n为样本数。

mg·L^{-1}，其中淡水占90.9%、微咸水占9.1%。水样中TH的变化范围为80.1~680.5 mg·L^{-1}，均值为250.56 mg·L^{-1}，其中软水、微硬水和极硬水分别占承压水水样的27.3%、54.5%和18.2%。

通过比较各离子含量均值可以得出地下水中阳离子以Na^+为主，阴离子以SO_4^{2-}为主。

3.1.2 地下水化学类型 为了分析研究区的地下水化学类型，运用Origin和ArcGIS软件绘制Piper三线图及地下水水化学类型分区图（图3和图4）。研究区的地下水水化学类型以SO_4·Cl–Na·Ca型和HCO_3·SO_4–Na·Ca型为主，SO_4·Cl–Na·Ca型主要分布于鄯善县城以北区域，以及迪坎乡和七克台镇的东南区域；HCO_3·SO_4–Na·Ca型主要分布在托克逊县的博斯坦乡和夏乡，高昌区以北的大河沿镇、红柳河园艺场、亚尔乡、葡萄沟街道和胜金乡，以及高昌区东南的三堡乡、二堡乡，鄯善县主要分布在火

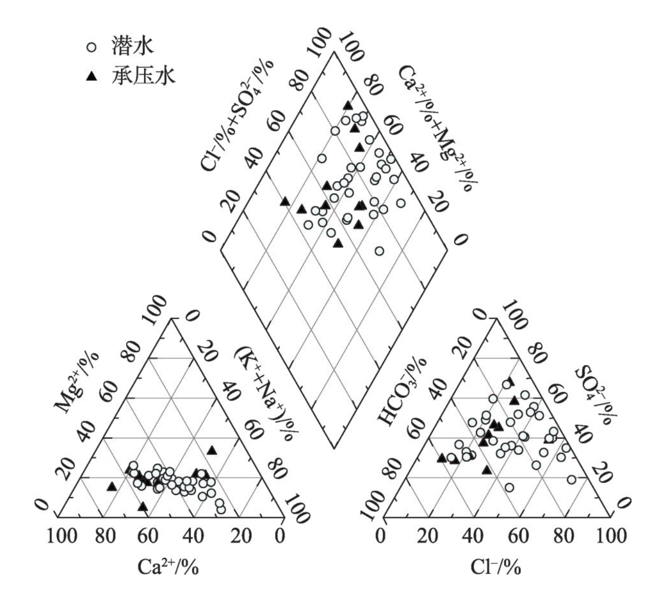


图3 地下水水化学Piper三线图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater hydrochemistry

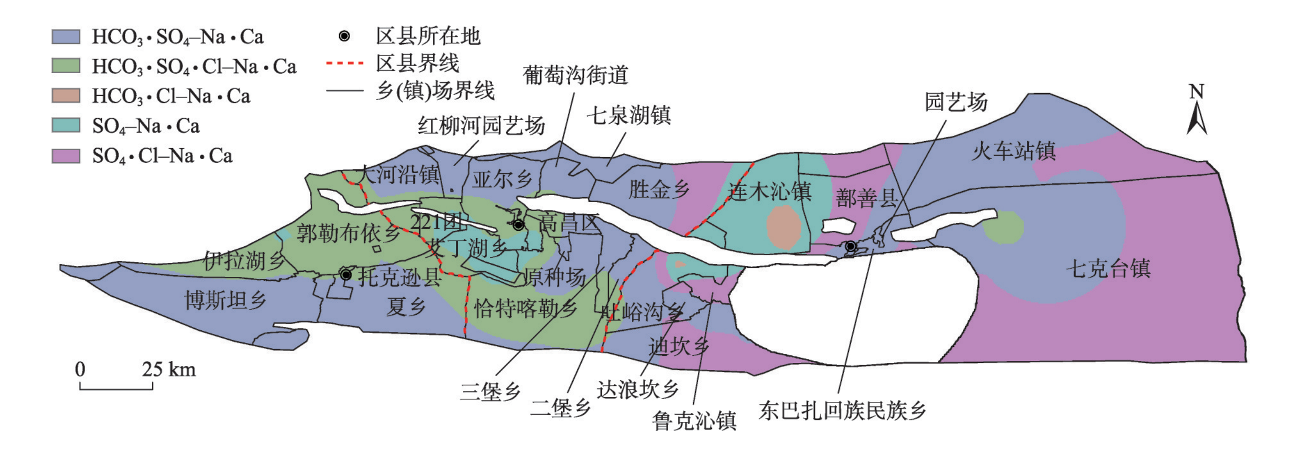


图4 地下水水化学类型分区

Fig. 4 Zoning map of groundwater hydrochemical types

车站镇和七克台镇;其次为 $HCO_3\cdot SO_4\cdot Cl-Na\cdot Ca$ 型,主要分布在托克逊县城以北和高昌区以南区域,由西向东呈带状分布在伊拉湖乡、郭勒布依乡、221团场和恰特喀勒乡。

3.2 水化学成因分析

3.2.1 蒸发浓缩作用　Gibbs图是一种半对数坐标图,可以直观判断出影响地下水化学形成作用的类型[4,17]。研究区潜水和承压水取样点均分布在Gibbs图的中部和右上部(图5),表明水化学特征受到了蒸发浓缩和岩石风化双重作用的影响。而大气降水对研究区的水化学特征几乎没有影响,这与研究区常年干旱、降水量少、蒸发强烈有关。

3.2.2 基于离子比分析　采用离子比值法进一步分析地下水中各化学成分的来源。

当 $\gamma(Na^++K^+)/\gamma Cl^->1$ 时,地下水中的 Na^+ 和 K^+ 主要受到岩盐溶解的影响,反之为硅酸盐溶解的影响[18]。由图6a可知,大多数潜水和承压水取样点都位于 $y=x$ 之上,有少量的潜水取样点位于 $y=x$ 之下,说明研究区地下水中的 Na^+ 和 K^+ 主要来自岩盐的溶解,少量潜水中的 Na^+ 和 K^+ 来自硅酸盐的溶解。

当 $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})>1$ 时,地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要受到碳酸盐溶解的影响,反之为蒸发岩或硅酸盐溶解的影响[19]。由图6b可以看出,大多数的潜水和承压水取样点都位于 $y=x$ 之下,少量潜水取样点位于 $y=x$ 之上,说明研究区地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于蒸发岩的溶解,部分潜水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来自碳酸盐的溶解。

当 $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma HCO_3^->1$ 时,地下水水化学成分主要受到蒸发岩溶解的影响,反之受到碳酸盐溶解的影响[20]。由图6c所示,绝大多数取样点位于 $y=x$ 之上,说明蒸发岩的溶解占主导作用。

当 $\gamma(Na^+-Cl^-)/\gamma[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]=-1$ 时,呈显著负相关,地下水发生阳离子交换作用[21]。如图6d所示,潜水和承压水取样点斜率均接近-1,说明研究区地下水发生了阳离子交换作用。

4　水质评价

4.1 评价过程实例

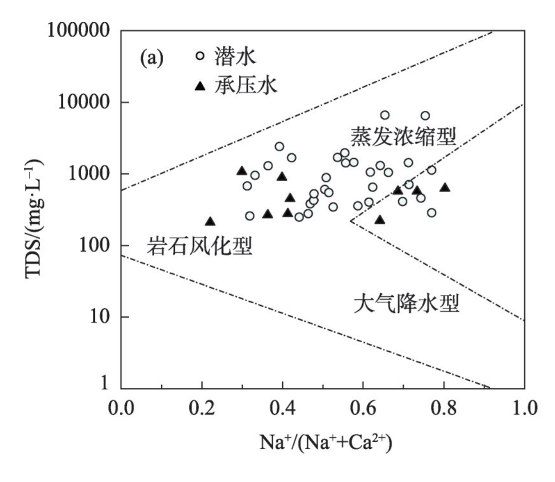
依据吐鲁番盆地平原区44组地下水水样检测数据,以《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)[22]为标准,选取检出率较高且存在超标的TH、TDS、Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+、Fe、Cr^{6+}、Cd、Zn共11项评价因子对研究区进行地下水质量评价。

内梅罗指数法和改进内梅罗指数法的水质评价过程较为简单,本文略去上述2种方法的评价过程;模糊综合评价法较上述2种方法评价步骤多,且计算量较大。本文主要介绍模糊综合评价法的评价过程。以研究区D7取样点(承压水)为例,评价过程描述如下。D7取样点的检测数据如表2所示。

4.1.1 建立评价因子集和评价集　评价因子集为:$U=\{TH、TDS、Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+、F_e、Cr^{6+}、Cd、Zn\}$;评价集为:$V=\{Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ\}$。

4.1.2 建立评价因子的权重矩阵 *A*　D7取样点的各评价因子的权重计算结果见表3。

评价因子的权重矩阵 *A* 为:



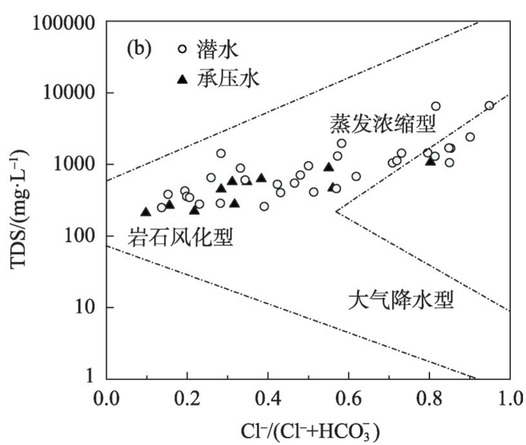


图5　地下水水化学Gibbs图

Fig. 5　Gibbs plots of groundwater hydrochemistry

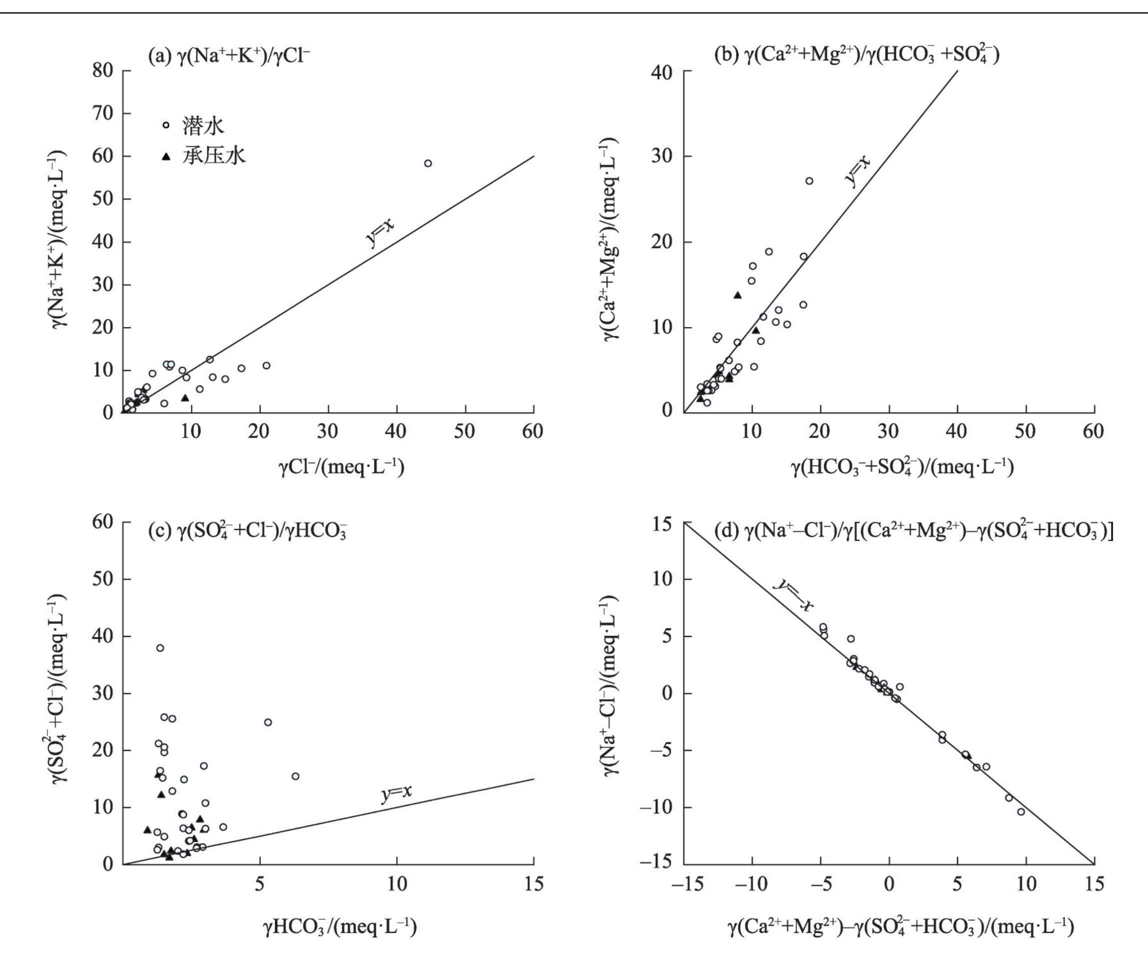


图6 地下水离子比值相关图

Fig. 6 Correlation diagram of iron ratio in groundwater

表2 D7取样点的水质检测数据

Tab. 2 Water quality test data at D7 sampling point /(mg·L⁻¹)

取样点	TH	TDS	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Fe	Cr^{6+}	Cd	Zn
D7	80.1	221.8	39.4	25.5	48	1.919	0.039	0.05	0.017	0.0015	0.025

表3 D7取样点各因子权重计算结果

Tab. 3 Weight calculation results of each factor at D7 sampling point

	TH	TDS	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Fe	Cr^{6+}	Cd	Zn
c_i	80.1	221.8	39.4	25.5	48	1.919	0.039	0.05	0.017	0.0015	0.025
$\bar{S}_{io}$	460	1260	270	240	240	18.4	0.824	1.09	0.058	0.00572	2.71
W_i	0.174	0.176	0.146	0.106	0.200	0.104	0.047	0.046	0.293	0.262	0.009
a_i	0.111	0.113	0.093	0.068	0.128	0.067	0.030	0.029	0.187	0.168	0.006

$$A=[0.111\ \ 0.113\ \ 0.093\ \ 0.068\ \ 0.128\ \ 0.067\ 0.030\ \ 0.029\ \ 0.187\ \ 0.168\ \ 0.006]$$

4.1.3 建立模糊评价矩阵 R 本次评价将地下水质量划分为5个等级，但事实上由于《地下水质量标准》(GB/T 14848−2017)中并没有单独规定的5类水标准值，而是规定大于4级标准值即为第5等级。因此，根据对称性原则定义 $S_{i5}=\frac{3}{2}S_{i4}-\frac{1}{2}S_{i3}$，使得第4级和第5级水质的隶属度函数具有连续性[23]。根据D7取样点的检测数据，分别计算出11项评价因子的5级水质标准的隶属度，建立模糊评价矩阵 R_7。然而每项评价因子都需计算5级水质标准的隶属度，计算量大且过程繁琐，本文利用Matlab软件来计算研究区44个取样点的模糊评价矩阵 R。

D7取样点模糊评价矩阵为：

$$R_7=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0\\1&0&0&0&0\\1&0&0&0&0\\1&0&0&0&0\\1&0&0&0&0\\1&0&0&0&0\\0.764&0.236&0&0&0\\1&0&0&0&0\\0&0.825&0.175&0&0\\0&0.875&0.125&0&0\\1&0&0&0&0\end{bmatrix}$$

4.1.4　建立评价结果矩阵 B　由模糊数学模型：$B=A\cdot R$ 计算出评价矩阵 B_7。

$$B_7=[0.638\quad 0.308\quad 0.054\quad 0\quad 0]$$

隶属度最大的一项所对应的水质级别为模糊综合评价的等级[24]。0.638最大，则D7取样点的水质等级为Ⅰ级。

按照同样的方法计算出研究区其他43个取样点的水质等级。评价结果见表4。

表4　模糊综合评价法的评价结果

Tab. 4　Evaluation results of fuzzy comprehensive evaluation method

类型	等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	监测点
潜水	Ⅰ	0.6594	0.3091	0.0314	0.0000	0.0000	D1
潜水	Ⅰ	0.7093	0.2712	0.0196	0.0000	0.0000	D10
潜水	Ⅰ	0.6815	0.3005	0.0180	0.0000	0.0000	D18
潜水	Ⅰ	0.5984	0.3854	0.0162	0.0000	0.0000	D20
潜水	Ⅰ	0.7159	0.2664	0.0177	0.0000	0.0000	D29
潜水	Ⅰ	0.7377	0.2443	0.0179	0.0000	0.0000	D32
潜水	Ⅰ	0.6077	0.3772	0.0151	0.0000	0.0000	D33
潜水	Ⅰ	0.6129	0.3730	0.0141	0.0000	0.0000	D34
潜水	Ⅰ	0.7895	0.1869	0.0237	0.0000	0.0000	D42
潜水	Ⅱ	0.1710	0.6956	0.1335	0.0000	0.0000	D13
潜水	Ⅱ	0.4583	0.5276	0.0141	0.0000	0.0000	D23
潜水	Ⅱ	0.1021	0.4532	0.4447	0.0000	0.0000	D25
潜水	Ⅱ	0.2525	0.7229	0.0246	0.0000	0.0000	D26
潜水	Ⅱ	0.1634	0.4882	0.3437	0.0047	0.0000	D30
潜水	Ⅱ	0.4598	0.5279	0.0123	0.0000	0.0000	D31
潜水	Ⅱ	0.2583	0.5294	0.2122	0.0000	0.0000	D40
潜水	Ⅱ	0.3092	0.6705	0.0203	0.0000	0.0000	D44
潜水	Ⅲ	0.0323	0.1781	0.4347	0.0138	0.3411	D16
潜水	Ⅲ	0.0174	0.1018	0.4311	0.1560	0.2938	D37
潜水	Ⅲ	0.0426	0.0985	0.6129	0.2459	0.0000	D38
潜水	Ⅲ	0.0460	0.2140	0.3617	0.0889	0.2893	D39
潜水	Ⅲ	0.0142	0.0924	0.3893	0.1603	0.3438	D43
潜水	Ⅴ	0.0223	0.0697	0.2896	0.3060	0.3124	D11
潜水	Ⅴ	0.1533	0.2263	0.2717	0.0307	0.3179	D17
潜水	Ⅴ	0.1273	0.1386	0.2396	0.1263	0.3683	D19
潜水	Ⅴ	0.0072	0.0072	0.0010	0.0000	0.9847	D21
潜水	Ⅴ	0.0145	0.0704	0.1200	0.0999	0.6952	D22
潜水	Ⅴ	0.0126	0.0226	0.1409	0.2321	0.5918	D24
潜水	Ⅴ	0.0184	0.0187	0.0527	0.0559	0.8543	D27
潜水	Ⅴ	0.0538	0.0945	0.1059	0.0485	0.6973	D28
潜水	Ⅴ	0.0182	0.1576	0.2734	0.2483	0.3025	D35
潜水	Ⅴ	0.0034	0.0203	0.0039	0.0000	0.9725	D36
潜水	Ⅴ	0.0141	0.0568	0.1672	0.1290	0.6328	D41
承压水	Ⅰ	0.7083	0.2663	0.0254	0.0000	0.0000	D2
承压水	Ⅰ	0.8152	0.1637	0.0211	0.0000	0.0000	D5
承压水	Ⅰ	0.6379	0.3084	0.0537	0.0000	0.0000	D7
承压水	Ⅰ	0.7628	0.2155	0.0217	0.0000	0.0000	D15
承压水	Ⅱ	0.2328	0.4969	0.2704	0.0000	0.0000	D3
承压水	Ⅱ	0.3664	0.5302	0.1034	0.0000	0.0000	D6
承压水	Ⅱ	0.3502	0.4860	0.1638	0.0000	0.0000	D8
承压水	Ⅱ	0.3439	0.5246	0.1314	0.0000	0.0000	D9
承压水	Ⅱ	0.4216	0.5551	0.0233	0.0000	0.0000	D14
承压水	Ⅳ	0.0724	0.0927	0.2748	0.4856	0.0744	D4
承压水	Ⅴ	0.1623	0.1330	0.3034	0.0268	0.3744	D12

表5 3种方法水质评价结果

Tab. 5 Water quality evaluation results of three methods

内梅罗指数法	数量	比例/%	改进内梅罗指数法	数量	比例/%	模糊综合评价法	数量	比例/%
Ⅰ类	0	0.0	Ⅰ类	0	0	Ⅰ类	13	29.5
Ⅱ类	25	56.8	Ⅱ类	25	56.8	Ⅱ类	13	29.5
Ⅲ类	0	0.0	Ⅲ类	2	4.5	Ⅲ类	6	13.7
Ⅳ类	2	4.5	Ⅳ类	17	38.7	Ⅳ类	1	2.3
Ⅴ类	17	38.7	Ⅴ类	0	0	Ⅴ类	11	25.0

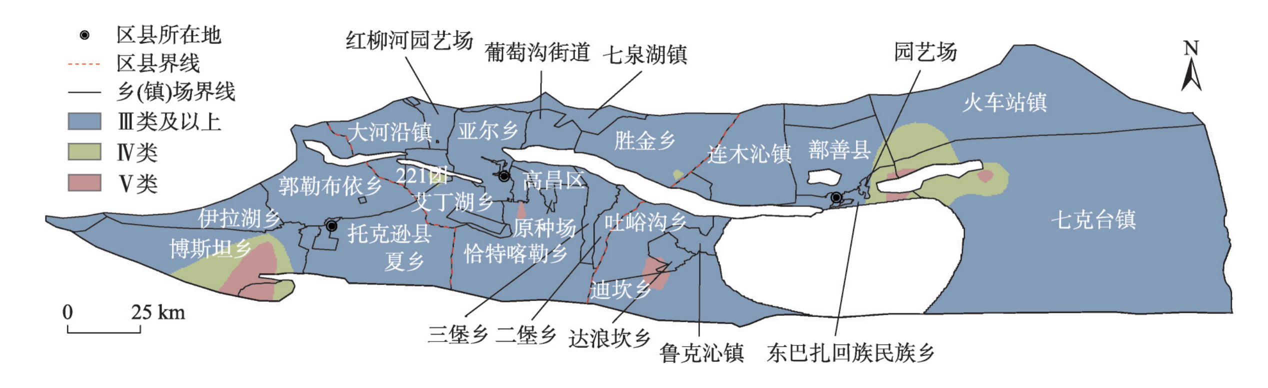


图7 地下水质量分区

Fig. 7 Distribution of groundwater quality

5 结果与分析

3种方法的评价结果见表5。在内梅罗指数法中，Ⅲ类及以上水质点有25个，约占总取样点的56.8%，而Ⅳ类、Ⅴ类水质点有19个，约占总取样点的43.2%。在改进内梅罗指数法中，Ⅲ类及以上水质点有27个，约占总取样点的61.3%，而Ⅳ类水质点有17个，约占总取样点的38.7%，无Ⅴ类水。在模糊综合评价法中，Ⅲ类及以上水质点有32个，约占总取样点的72.7%，而Ⅳ类、Ⅴ类水取样点有12个，约占27.3%。

由表5可以看出，不同方法间的评价结果有一定的差异，改进内梅罗指数法和模糊综合评价法与《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)中推荐的内梅罗指数法(F值评分法)的评价结果契合度为56.8%、52.3%。改进内梅罗指数法和内梅罗指数法的评价结果一致性最好，但是内梅罗指数法中的Ⅳ、Ⅴ类水占比最高为43.2%，是因为内梅罗指数法在计算综合评分值时，过于突出单项组分的最大值对地下水的影响程度，而且认为所有的评价因子对地下水质量的影响程度是相同的[25]，而改进内梅罗指数法赋予不同评价因子权重值，削弱了最大值的影响，Ⅳ、Ⅴ类水占比较内梅罗指数法有所下降，为38.7%。模糊综合评价法中的Ⅳ、Ⅴ类水占比最低为27.3%，是因为其通过构建隶属度函数充分考虑了各级水质标准的接近程度，又考虑了评价因子的权重，更加综合的反映水质情况，得到较好的水质评价结果[26]。

从评价结果上来看，Ⅲ类及以上水质占比由高到低为：模糊综合评价法、改进内梅罗指数法、内梅罗指数法。依据模糊综合评价法的评价结果绘制地下水质量分区图(图7)。吐鲁番盆地平原区地下水大部分为Ⅲ类及以上水质，Ⅳ、Ⅴ类水主要分布在托克逊县的博斯坦乡和鄯善县以东的火车站镇和七克台镇。

6 结 论

(1) 吐鲁番盆地平原区潜水和承压水均为弱碱性水，承压水的淡水和软水比例均高于潜水；地下水中阳离子以Na^+为主，其次为Ca^{2+}；阴离子以SO_4^{2-}为主，其次为Cl^-；水化学类型主要为SO_4·Cl-Na·Ca型，其次为HCO_3·SO_4-Na·Ca型和HCO_3·SO_4·Cl-Na·Ca型。

(2) 研究区地下水水化学特征主要受蒸发浓缩

和岩石风化共同作用的影响,不受大气降水的影响。地下水中的Na^+、K^+、Cl^-主要来自岩盐的溶解,少量潜水中的Na^+和K^+来自硅酸盐的溶解;Ca^{2+}、Mg^{2+}主要来自蒸发岩的溶解。除此之外,研究区地下水还受到阳离子交换作用的影响。

(3) 从3种水质评价方法的结果来看,研究区Ⅲ类及以上水质占比均高于55%,地下水质量整体较好;改进内梅罗指数法和内梅罗指数法的评价结果契合度最高,为56.8%;模糊综合评价法的Ⅳ、Ⅴ类水占比最低为27.3%,Ⅳ、Ⅴ类水主要分布在托克逊县的博斯坦乡和鄯善县以东的火车站镇和七克台镇。

参考文献(References):

[1] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 321-326. [Hu Ruji, Fan Zili, Wang Yajun, et al. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 321-326.]

[2] 蔺悦霞. 吐鲁番市2020年地下资源评价分析[J]. 陕西水利, 2020(11): 47-49. [Lin Yuexia. Evaluation and analysis of underground resources in Turpan in 2020[J]. Shaanxi Water Resources, 2020(11): 47-49.]

[3] 商佐, 唐蕴, 杨姗姗. 近30年吐鲁番盆地地下水动态特征及影响因素分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 192- 203. [Shang Zuo, Tang Yun, Yang Shanshan. Analysis of groundwater dynamic characteristics and influencing factors in Turpan Basin in recent 30 years[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 192-203.]

[4] 纪媛媛, 周金龙, 孙英, 等. 新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(3): 551-560. [Ji Yuanyuan, Zhou Jinlong, Sun Ying, et al. Groundwater Chemical characteristics and water quality evaluation for groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(3): 551-560.]

[5] 姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 122-127. [Jiang Tisheng, Qu Cixiao, Wang Mingyu, et al. Hydrochemical characteristics and of shallow groundwater and the origin in Pinggu plain, Beijing[J]. Journal of Arid land Resources and Environment, 2017, 31(11): 122-127.]

[6] 王礼恒, 董艳辉, 宋凡, 等. 甘肃石油河流域地下水补给来源与演化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 54-61. [Wang Liheng, Dong Yanhui, Song Fan, et al. Recharge sources and hydrochemical properties of groundwater in the Shiyou River, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 54-61.]

[7] 竹娜, 胡伏生, 张强, 等. 吐鲁番盆地地下水化学分析[J]. 地下水, 2015, 37(5): 25-28, 32. [Zhu Na, Hu Fusheng, Zhang Qiang, et al. Chemical analysis of groundwater in Turpan Basin[J]. Ground Water, 2015, 37(5): 25-28, 32.]

[8] 蒋万军, 赵丹, 王广才, 等. 新疆吐-哈盆地地下水水文地球化学特征及形成作用[J]. 现代地质, 2016, 30(4): 825-833. [Jiang Wanjun, Zhao Dan, Wang Guangcai, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation of groundwater in Tu-Ha Basin, Xinjiang[J]. Geoscience, 2016, 30(4): 825-833.]

[9] 杨广焱, 李巧, 周金龙. 新疆吐鲁番地区地下水质量与污染评价[J]. 节水灌溉, 2014(2): 29-32. [Yang Guangyan, Li Qiao, Zhou Jinlong. Evaluation of groundwater quality and the pollution in Xinjiang Turpan area[J]. Water Saving Irrigation, 2014(2): 29-32.]

[10] 袁月. 吐鲁番盆地地下水功能区划分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. [Yuan Yue. Analysis of Functional Area Division of Groundwater in Turpan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.]

[11] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005. [Dong Xinguang, Deng Mingjiang. Groundwater Resources in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2005.]

[12] 商佐. 吐鲁番盆地地下水动态特征及控制性水位分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2020. [Shang Zuo. Analysis of Groundwater Dynamic Characteristics and Controlling Water Level in Turpan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.]

[13] 吴豪. 吐鲁番盆地地下水水化学演化特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018. [Wu Hao. Study on the Groundwater Chemical Evolution in Turpan Basin [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.]

[14] DZ/T 0288-2015. 中华人民共和国地质矿产行业标准:区域地下水污染调查评价规范[S]. 北京:地质出版社, 2015. [DZ/T 0288-2015. Industry Standard of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China: Specification for Regional Groundwater Contamination Investigation and Evaluation[S]. Beijing: Geology Press, 2015.]

[15] HJ/T 164-2020. 中华人民共和国国家环境保护标准:地下水环境监测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2020. [HJ/T 164-2020. National Environmental Protection Standard of the People's Republic of China: Technical Specifications for Environmental Monitoring of Groundwater[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.]

[16] 曾小仙, 曾妍妍, 周金龙, 等. 石河子市浅层地下水化学特征及其成因分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 68-75. [Zeng Xiaoxian, Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, et al. Hydrochemical characteristics and cause analysis of the shallow groundwater in Shihezi City [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 68-75.]

[17] 邢丽娜. 华北平原典型剖面上地下水化学特征和水文地球化学过程[D]. 北京: 中国地质大学, 2012. [Xing Lina. Groundwater Hydrochemical Characteristics and Hydrogeochemical Processes Approximately along Flow Paths of Groundwater in the North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.]

[18] 栾风娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380-389. [Luan Fengjiao, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380-389.]

[19] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 370-378. [An Lesheng, Zhao Quansheng, Ye Siyuan, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 370-378.]
[20] 李小等. 青海省诺木洪地区地下水化学特征及演化规律[D]. 西安: 长安大学, 2012. [Li Xiaodeng. Study on the Froundwater Chemistry Evolution of Nuomuhong Area in Qinghai Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.]
[21] 赵江涛. 新疆焉耆盆地平原区地下水化学特征及演化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. [Zhao Jiangtao. Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in Plain Area of Yanqi Basin, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.]
[22] GB/T 14848-2017. 中华人民共和国国家标准:地下水质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2017. [GB/T 14848-2017. National Standard of the People's Republic of China: Standard for Groundwater Quality[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.]
[23] 倪天翔. 应用于地下水质评价的模糊综合评判法及其优化[J]. 地下水, 2021, 43(1): 17-19. [Ni Tianxiang. Optimization and application of fuzzy comprehensive evaluation method in groundwater quality evaluation[J]. Ground Water, 2021, 43(1): 17-19.]
[24] 吕梦华. 模糊综合评价法在人工湖水质评价中的应用——以郑州大学眉湖为例[J]. 科技致富向导, 2014(23): 259-260. [Lyu Menghua. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation of artificial lake: Taking Mei Lake of Zhengzhou university as an example[J]. Technology Rich Guide, 2014(23): 259-260.]
[25] 傅周燕. 新疆淖毛湖盆地地下水水质评价及水文地球化学模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. [Fu Zhouyan. Evaluation of Groundwater Quality and Hydrogeochemical Simulation in Nuomaohu Basin of Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.]
[26] 程敏, 姜纪沂, 任杰, 等. 察布查尔县地区地下水水化学特征及地下水水质评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 527-534. [Cheng Min, Jiang Jiyi, Ren Jie, et al. Groundwater hydrochemical characteristics and groundwater quality evaluation in Qapqal County area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 527-534.]

Hydrochemical characteristics and quality of groundwater in the plains of the Turpan Basin

BAI Fan[1,2,3], ZHOU Jinlong[1,2,3], ZENG Yanyan[1,2,3]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: In order to study the hydrochemical characteristics and quality of groundwater in the plains of Turpan Basin, 44 groundwater samples (33 phreatic water and 11 confined water) were analyzed. The latest comprehensive groundwater pollution survey data in Turpan Basin in 2015 was used. Mathematical statistics, Piper trilinear diagram, Gibbs diagram, and the ion ratio method were used to analyze the hydrochemical characteristics of groundwater. The Nemerow index method, improved Nemerow index method, and fuzzy comprehensive evaluation method were used to evaluate groundwater quality. The results showed that groundwater was weakly alkaline, with low salinity. The main groundwater hydrochemical types were SO_4·Cl−Na·Ca and HCO_3·SO_4−Na·Ca, followed by HCO_3·SO_4·Cl−Na·Ca. Groundwater chemical composition was mainly affected by evaporation concentration and rock weathering. Ca^{2+} and Mg^{2+} in groundwater are mainly derived from the dissolution of evaporite; Na^+, K^+ and Cl^- are derived from the dissolution of rock salt, and a small amount of Na^+ and K^+ in partial phreatic water comes from the dissolution of silicate. $\gamma(Na^+-Cl^-)/\gamma[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(SO_4^{2-}+HCO_3^-]=-1$ showed a significant negative correlation, indicating that the formation of groundwater chemical components was affected by cation exchange. In the three evaluation methods, the proportion of grade Ⅲ and higher water quality was >55%, and the groundwater quality was good on the whole; the proportion of grade Ⅳ and Ⅴ water in the fuzzy comprehensive evaluation method was the lowest (27.3%), and grades Ⅳ and Ⅴ water were mainly distributed in the Bostan township of Toksun County and Railway station town and Qiketai town to the east of Shanshan County.

Keywords: Turpan Basin; groundwater; hydrochemical characteristics; quality evaluation